

BEST AVAILABLE COPY

DIALOG(R) File 351:Derwent WPI
(c) 2003 Thomson Derwent. All rts. reserv.

013598927 **Image available**

WPI Acc No: 2001-083134/ 200110

XRAM Acc No: C01-024267

XRPX Acc No: N01-063512

Heterojunction transistor including III-V semiconductor with materials of wide and narrow forbidden bands, includes fourth element permitting band gap adjustments and operation with lower supply voltages

Patent Assignee: PICO GIGA SA (PICO-N); PICO GIGA (PICO-N)

Inventor: NUYEN L T

Number of Countries: 022 Number of Patents: 005

Patent Family:

| Patent No | Kind | Date | Applicat No | Kind | Date | Week |
|---------------|------|----------|---------------|------|----------|----------|
| FR 2795871 | A1 | 20010105 | FR 998487 | A | 19990701 | 200110 B |
| WO 200103194 | A1 | 20010111 | WO 2000FR1806 | A | 20000628 | 200123 |
| EP 1192665 | A1 | 20020403 | EP 2000949562 | A | 20000628 | 200230 |
| | | | WO 2000FR1806 | A | 20000628 | |
| KR 2002019488 | A | 20020312 | KR 2001716985 | A | 20011231 | 200262 |
| JP 2003504851 | W | 20030204 | WO 2000FR1806 | A | 20000628 | 200320 |
| | | | JP 2001508505 | A | 20000628 | |

Priority Applications (No Type Date): FR 998487 A 19990701

Patent Details:

| Patent No | Kind | Lan | Pg | Main IPC | Filing Notes |
|-----------|------|-----|----|----------|--------------|
|-----------|------|-----|----|----------|--------------|

| | | | | | |
|------------|----|----|--|--------------|--|
| FR 2795871 | A1 | 23 | | H01L-029/205 | |
|------------|----|----|--|--------------|--|

| | | | | | |
|--------------|------|--|--|--------------|--|
| WO 200103194 | A1 F | | | H01L-029/201 | |
|--------------|------|--|--|--------------|--|

Designated States (National): JP KR US

Designated States (Regional): AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LU MC NL PT SE

| | | | | | |
|------------|------|--|--|--------------|------------------------------|
| EP 1192665 | A1 F | | | H01L-029/201 | Based on patent WO 200103194 |
|------------|------|--|--|--------------|------------------------------|

Designated States (Regional): AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU MC NL PT SE

| | | | | | |
|---------------|---|--|--|--------------|--|
| KR 2002019488 | A | | | H01L-029/778 | |
|---------------|---|--|--|--------------|--|

| | | | | | |
|---------------|---|----|--|--------------|------------------------------|
| JP 2003504851 | W | 26 | | H01L-029/201 | Based on patent WO 200103194 |
|---------------|---|----|--|--------------|------------------------------|

Abstract (Basic): FR 2795871 A1

NOVELTY - The material with narrow forbidden band is a III-V composition including gallium as one of the group III elements, and arsenic and nitrogen as V group elements. The nitrogen content is less than 5%. The material at the narrow forbidden band comprises at least a fourth element from group III or V. The addition of this fourth element permits adjustment of the width of the forbidden band, the discontinuity of the conduction band ΔE_{c} and the discontinuity of the valence band ΔE_{v} of the heterojunction.

USE - To make heterojunction transistors of field effect or bipolar types using group III-V element compositions.

ADVANTAGE - HEMT field effect transistors are produced, with very narrow forbidden band, hence with increased drain current. The invention is also applicable to production of bipolar heterojunction transistors with low base-emitter voltage, hence able to operate at very low supply voltages.

DESCRIPTION OF DRAWING(S) - The energy bands of a GaAs/GaAsN heterojunction are illustrated as a starting point. Further energy level diagrams show a variety of improvements using differing combinations of elements.

AN

pp; 23 DwgNo 1/10

Title Terms: HETEROJUNCTION; TRANSISTOR; SEMICONDUCTOR; MATERIAL; WIDE;
NARROW; FORBID; BAND; FOURTH; ELEMENT; PERMIT; BAND; GAP; ADJUST; OPERATE
; LOWER; SUPPLY; VOLTAGE

Derwent Class: L03; U11; U12

International Patent Class (Main): H01L-029/201; H01L-029/205; H01L-029/778

International Patent Class (Additional): H01L-021/331; H01L-021/338;

H01L-029/737; H01L-029/812

File Segment: CPI; EPI

Manual Codes (CPI/A-N): L04-A02; L04-E01

Manual Codes (EPI/S-X): U11-A01B; U12-D01A2

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

①⑪ N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

2 795 871

②① N° d'enregistrement national :

99 08487

⑤① Int Cl⁷ : H 01 L 29/205, H 01 L 29/737

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②② Date de dépôt : 01.07.99.

③⑦ Priorité :

⑦① Demandeur(s) : *PICOGIGA SA Société anonyme — FR.*

④③ Date de mise à la disposition du public de la
demande : 05.01.01 Bulletin 01/01.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

⑥⑦ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

⑦② Inventeur(s) : *NUYEN LINH T.*

⑦③ Titulaire(s) :

⑦④ Mandataire(s) : *CABINET BARDEHLE PAGENBERG
ET PARTNER.*

⑤④ TRANSISTOR III-V A HETEROJONCTION, NOTAMMENT TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP HEMT OU
TRANSISTOR BIPOLAIRE A HETEROJONCTION.

⑤⑦ Le transistor à hétérojonction comprend des maté-
riaux semi-conducteurs III-V avec un matériau à grande
bande interdite et un matériau à petite bande interdite. Le
matériau à petite bande interdite est un composé (III-V con-
tenant le gallium comme l'un des éléments III et à la fois l'ar-
senic et l'azote comme éléments V, la teneur en azote étant
inférieure à 5 % environ, et le matériau à petite bande inter-
dite comporte au moins un quatrième élément, III ou V.
L'addition de ce quatrième élément permet d'ajuster la lar-
geur de la bande interdite, la discontinuité de la bande de
conduction ΔE_c et la discontinuité de la bande de valence
 ΔE_v de l'hétérojonction. L'invention s'applique à la réalisa-
tion de transistors à effet de champ du type HEMT à très fai-
ble bande interdite, donc à courant de drain élevé. Elle
s'applique également à la réalisation de transistors bipolai-
res à hétérojonction à faible V_{BE} , donc pouvant fonctionner
sur de très faibles tensions d'alimentation.

FR 2 795 871 - A1



L'invention concerne les transistors à hétérojonction de la catégorie des transistors à effet de champ ou de celle des transistors bipolaires, utilisant des alliages de semi-conducteurs III-V.

Les semi-conducteurs III-V, dont le plus connu est l'arséniure de gallium

5 GaAs, constituent une vaste famille faisant intervenir un ou plusieurs éléments de la colonne III et un ou plusieurs éléments de la colonne V du tableau de Mendeleïev. Ainsi on trouve :

- des composés binaires tels que GaAs ou InP ;
- des composés ternaires tels que AlGaAs ou GaInAs ou GaInP ;
- 10 - des composés quaternaires tels que GaInAsP ou AlGaSbAs.

Dans les alliages ternaires ou quaternaires, les éléments III se substituent entre eux et les éléments V aussi se substituent entre eux de telle manière que l'ensemble des éléments III et l'ensemble des éléments V soient à égale composition : par exemple, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ou $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$. Pour ne pas alourdir le texte, on adoptera dans ce qui va suivre l'écriture simple AlGaAs ou GaInAsP. Quand cela sera nécessaire, on spécifiera la teneur en chacun des éléments. De plus, les différents éléments composant un alliage seront donnés dans l'ordre normalisé (du plus électropositif au moins électropositif), et non par teneur décroissantes.

15 L'intérêt de ces alliages ternaires ou quaternaires, voire quinquénaires, dans la réalisation de composants électroniques provient du fait que la substitution d'un élément III à un autre ou d'un élément V à un autre modifie les propriétés électroniques de l'alliage, par exemple la masse effective des électrons ou des trous, ou encore la largeur de la bande interdite. Et l'on met à profit ces modifications pour réaliser des hétérojonctions, c'est-à-dire des jonctions de deux matériaux de natures différentes, par exemple AlGaAs/GaAs ou GaInP/GaAs, etc.

Les lasers à semi-conducteurs AlGaAs/GaAs ou GaInP/AlGaInP ou InGaAs/GaAs/GaInP sont des exemples bien connus de l'utilisation des hétérojonctions pour réaliser des lasers émettant des longueurs d'onde respectivement de 870, 670 et 980 nanomètres.

30 Les transistors à effet de champ dits de haute mobilité électronique ou *High Electron Mobility Transistor* (HEMT) faisant intervenir les hétérojonctions AlGaAs/GaAs ou AlGaAs/GaInAs/GaAs sont aussi très connus pour leurs performances améliorées par rapport aux transistors classiques

GaAs sans hétérojonction.

Les transistors bipolaires à hétérojonction (TBH ou HBT) de type AlGaAs/GaAs ou GaInP/GaAs sont aussi connus pour leurs performances accrues par rapport aux transistors bipolaires GaAs sans hétérojonction.

- 5 Malgré la souplesse de combinaison des alliages de semi-conducteurs III-V entre eux sous forme d'hétérojonction, il existe cependant une limitation dans cette combinaison.

En effet, on ne sait associer les différents matériaux entre eux que s'ils ont le même paramètre de maille cristalline ou sont de paramètres de maille très voisins, afin qu'il n'apparaisse pas de forte contrainte mécanique entre les différents matériaux. Une forte contrainte peut créer des dislocations naissant à l'interface entre deux matériaux et se propageant ensuite au sein d'un des deux matériaux, dégradant ainsi la qualité de ces matériaux et par la suite la qualité du composant électronique. Lorsqu'il existe un faible désaccord de paramètre de maille entre deux matériaux, on peut, par épitaxie, réaliser une hétérojonction sans faire apparaître de dislocations à son interface, car la contrainte mécanique créée est suffisamment faible pour que le matériau reste en régime de déformation élastique. Il est connu que la déformation élastique est une fonction à la fois de l'écart de paramètres de réseau cristalline et de l'épaisseur de la couche contrainte. En deçà d'une certaine épaisseur, dite "épaisseur critique", la couche reste en état de déformation élastique, donc sans dislocation, et au-delà de l'épaisseur critique les contraintes se relâchent par apparition de dislocations.

- 25 Beaucoup de composants électroniques utilisent cette possibilité de contrainte élastique pour pouvoir disposer d'hétérojonctions de caractéristiques électroniques intéressantes. Par exemple, on réalise des hétérojonctions AlGaAs/GaInAs où la teneur en indium peut atteindre 25 %, créant ainsi un désaccord de paramètre approchant 2 % imposant ainsi une épaisseur critique de l'ordre de 10 nanomètres.

30 Ce matériau contraint GaInAs présente par rapport au matériau non contraint GaAs des avantages pour réaliser des transistors HEMT : amélioration de la mobilité électronique, discontinuité de bande de conduction à l'interface de l'hétérojonction avantageusement plus importante. Ces transistors HEMT utilisant le matériau à faible bande interdite en état de con-

trainte élastique sont appelés "HEMT pseudomorphiques". Les HEMT pseudomorphiques sont très utilisés en amplification faible bruit comme en amplification de puissance.

5 Les transistors TBH utilisent peu cet état pseudomorphique, car la base du transistor TBH est généralement de l'ordre de 100 nanomètres, donc supérieure à l'épaisseur critique des matériaux en désaccord de maille et susceptibles de présenter des caractéristiques électroniques intéressantes. Ainsi, on ne connaît pas de produits industriels TBH pseudomorphiques.

10 D'autre part, du fait que les hétérojonctions sont généralement réalisées par épitaxie sur un substrat, c'est le substrat qui impose le paramètre de maille. Pour des raisons pratiques, les substrats sont des composés binaires, dont le plus développé au point de vue industriel est GaAs. Vient ensuite InP qui est difficile à fabriquer donc cher et qui, de plus, est fragile et cassant. Malgré ce handicap, InP est souvent utilisé car il offre la possibilité de réaliser des alliages comme GaInAs ou encore GaInAsP à très forte teneur en indium, allant jusqu'à 60 %. Ces alliages présentent des propriétés électroniques intéressantes, telles que la faible bande interdite allant de 0,6 à 1 eV.

20 Ainsi, dans l'état de l'art actuel, les transistors HEMT les plus utilisés peuvent être classés en deux catégories. La première catégorie utilise un substrat GaAs et des arséniures comme matériau à petite bande interdite : GaAs pour les HEMT non pseudomorphiques et GaInAs pour les HEMT pseudomorphiques avec une teneur en indium allant jusqu'à 25 % environ. La deuxième catégorie utilise un substrat InP et des arséniures comme matériau à petite bande interdite : GaInAs à 52 % de teneur en indium pour les HEMT non pseudomorphiques et jusqu'à 65 % environ pour les HEMT pseudomorphiques.

25 En ce qui concerne les TBH, ils peuvent, de la même manière, être classés dans l'état de l'art actuel en deux catégories : ceux sur substrat GaAs avec GaAs comme matériau à petite bande interdite, et ceux sur substrat InP avec GaInAs (52 % de teneur en indium) comme matériau à petite bande interdite. Comme rappelé plus haut, les TBH pseudomorphiques n'ont pas connu de développement industriel.

35 Dans les HEMT tout comme dans les TBH, l'utilisation des arséniures

comme matériau à faible bande interdite présente néanmoins des limitations.

Dans les HEMT, les limitations se présentent comme suit : la principale caractéristique des HEMT est que l'association d'un matériau à grande bande interdite, généralement AlGaAs, à un matériau à petite bande interdite GaAs ou GaInAs permet d'avoir un gaz d'électrons bidimensionnel accumulé dans le matériau à petite bande interdite lorsque l'on dope le matériau à grande bande interdite. Ce transfert d'électrons du matériau à grande bande interdite vers le matériau à petite bande interdite est d'autant plus efficace que la discontinuité de la bande de conduction ΔE_c est plus grande. Et une forte densité de gaz d'électrons bidimensionnel permet d'avoir un plus fort courant de drain du transistor, donc une amplification en puissance plus efficace. Or, dans le système arséniure avec la combinaison AlGaAs/GaAs ou AlGaAs/GaInAs, la discontinuité ΔE_c est limitée. D'une part ΔE_c , qui augmente avec la teneur en aluminium dans AlGaAs, ne peut pas dépasser une certaine valeur car au-delà de 22 % en aluminium, des défauts gênants dits "centres DX" apparaissant dans AlGaAs, et au-delà de 40 % le matériau AlGaAs présente une bande interdite indirecte. D'autre part, l'addition d'indium dans GaAs permet aussi d'augmenter ΔE_c mais, comme rappelé plus haut, on ne peut guère dans la pratique, dépasser 25 %. Si bien qu'en pratique, le système AlGaAs/GaInAs présente un maximum de ΔE_c de l'ordre de 400 meV. Dans la catégorie des HEMT sur substrat InP où le matériau à grande bande interdite est AlInAs (53 % en indium) et celui à petite bande interdite est GaInAs (allant jusqu'à 65 % en indium), ΔE_c ne dépasse pas 600 meV.

Dans les TBH, les limitations se présentent comme suit : l'une des caractéristiques importantes du TBH est la tension V_{BE} qu'il faut appliquer à la base par rapport à l'émetteur pour que le collecteur reçoive le courant. Cette tension d'ouverture V_{BE} dépend fortement de la largeur de la bande interdite du matériau qui constitue la base. Par exemple, si le matériau de la base est GaAs, la tension d'ouverture V_{BE} est de l'ordre de 1 volt. Or l'une des applications la plus importante, en volume, des TBH est l'amplification de puissance dans les téléphones portables. Dans cette application, la tension d'alimentation est délivrée par une batterie et, pour des raisons, entre autres, de poids de cette batterie et de compatibilité de

tension d'alimentation d'autres fonctions électroniques contenues dans le téléphone portable, la tension d'alimentation baisse au fur et à mesure que la technologie des semi-conducteurs progresse. En 1999, la tension la plus basse utilisée dans le téléphone de poche est de l'ordre de 3 volts, de sorte qu'avec un TBH dont la base est GaAs, une tension V_{BE} de 1 volt est tout à fait viable car il reste encore 2 volts efficaces. Mais lorsque la tension baisse vers 1,5 volt ou moins, une tension V_{BE} de 1 volt n'est plus acceptable. Il faut donc baisser la tension V_{BE} , autrement dit avoir la base du TBH constituée d'un matériau de bande interdite la plus petite possible. Une solution serait d'utiliser la deuxième catégorie de TBH en épitaxie sur InP, puisque la base constituée de GaInAs (52 % de teneur en indium) présente une bande interdite de l'ordre de 0,75 eV et pourrait conduire à une tension d'ouverture V_{BE} de l'ordre de 0,3 volt. Mais, comme rappelé plus haut, le substrat InP est cher et fragile. Donc le coût du composant sera trop élevé pour une application industrielle dont la réduction des coûts est un facteur majeur.

Pour pallier ces inconvénients, la présente invention propose, essentiellement, d'utiliser des transistors à hétérojonction où le matériau à petite bande interdite est constitué par un alliage faisant intervenir à la fois au moins deux éléments V, l'arsenic et l'azote.

En effet, les composés III-V qui contiennent à la fois l'arsenic et l'azote ont la particularité de présenter une largeur de bande interdite plus faible que ceux qui n'en contiennent pas. En d'autres termes, la substitution d'une faible fraction d'arsenic par la même fraction d'azote fait baisser fortement la valeur de la bande interdite. Par exemple, le composé GaAsN à 4 % d'azote présente une largeur de bande interdite de 1 eV environ, alors que GaAs a pour largeur de bande interdite 1,42 eV. Cette propriété est particulière car, GaN étant un matériau à très grande bande interdite (3,4 eV), une règle simple, qui s'applique souvent dans les composés III-V, conduirait à donner au composé GaAsN une bande interdite plus élevée que GaAs. Cette propriété exceptionnelle a été signalée pour la première fois par M. Weyers et coll., *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 31 (1992), 853, et les calculs théoriques confirment ces résultats expérimentaux (S. Sakai et coll., *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 32 (1993), 4413).

Le paramètre de maille des composés GaAsN suit la loi de Vegard, c'est-

à-dire qu'il varie linéairement avec la teneur en azote. Donc, lorsque l'on dépose une couche mince de GaAsN par épitaxie sur un substrat GaAs, cette couche mince se trouve dans un état de contrainte, sachant que le paramètre de maille cristalline de GaN (0,45 nm) est plus faible que celui de GaAs (0,565 nm). Les travaux de Y. Qiu et coll. (*Appl. Phys. Lett.*, 70 (24), 3242 (1997)) et ceux de E.V.K. Rao et coll. (*Appl. Phys. Lett.* 72 (12), 1409 (1998)) montrent que l'épaisseur critique des couches de GaAsN épitaxiées sur substrat GaAs est élevée et peut atteindre 100 nm pour une teneur en azote de l'ordre de quelques pour cents. Une telle épaisseur est tout à fait adaptée à la réalisation de transistors HEMT ou TBH.

Le paramètre de maille de GaAsN étant plus faible que celui de GaAs, on peut ajouter dans ce composé ternaire un élément chimique qui a pour effet d'augmenter son paramètre de maille. Ainsi, M. Kondow et coll. (*Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 35 (1996), 1273) propose d'ajouter de l'indium pour former un composé quaternaire GaInAsN. Selon ces auteurs, ce composé quaternaire présente avec GaAs une grande discontinuité de bande de conduction ΔE_c rendant son utilisation intéressante dans la réalisation de lasers à grande stabilité thermique.

Plus précisément, l'invention propose un transistor à hétérojonction, comprenant des matériaux semi-conducteurs III-V avec un matériau à grande bande interdite et un matériau à petite bande interdite, caractérisé en ce que : le matériau à petite bande interdite est un composé III-V contenant le gallium comme l'un des éléments III et à la fois l'arsenic et l'azote comme éléments V, la teneur en azote étant inférieure à 5 % environ, et le matériau à petite bande interdite comporte au moins un quatrième élément, III ou V, de manière que l'addition de ce quatrième élément permette d'ajuster la largeur de la bande interdite, la discontinuité de la bande de conduction ΔE_c et la discontinuité de la bande de valence ΔE_v de l'hétérojonction.

La grande valeur de ΔE_c du composé GaInAsN peut être avantageusement utilisée pour la réalisation de transistors HEMT.

Dans ce cas, selon diverses caractéristiques subsidiaires avantageuses :

- le quatrième élément est l'indium, substitué au gallium en une fraction d'au plus 10 % environ de manière à procurer une bande inter-

dite de 0,8 eV environ, une discontinuité de bande de conduction de 500 meV environ et une discontinuité de bande de conduction de 100 meV environ ;

- 5 - le matériau à grande bande interdite est soit AlGaAs de fraction molaire en aluminium de 25 % environ, de manière à procurer une discontinuité ΔE_c de 800 meV environ et une discontinuité ΔE_v de 300 meV environ, soit GaInP de fraction molaire en indium de 50 % environ, de manière à procurer une discontinuité ΔE_c de 500 meV environ et une discontinuité ΔE_v de 500 meV environ ;
- 10 - le quatrième élément est l'indium de fraction molaire 40 % environ, procurant ainsi un matériau à petite bande interdite en fort désaccord de maille par rapport au substrat GaAs, ce matériau à petite bande interdite étant épitaxié sur le substrat GaAs sans dislocations, et le matériau à grande bande interdite est AlInAs à 40 %
- 15 d'indium environ, de manière à procurer une discontinuité ΔE_c atteignant 1 eV environ ;
- le transistor est un transistor à effet de champ du type HEMT pseudomorphique, le matériau à petite bande interdite GaInAsN possédant une composition en indium et en azote telle que son paramètre de maille soit plus élevé que celui du substrat GaAs et qu'il soit
- 20 dans un état de contrainte élastique, et le matériau à grande bande interdite est AlGaAs, de manière à procurer des discontinuités ΔE_c et ΔE_v de 900 meV environ.

25 L'invention s'applique également à la réalisation de transistors bipolaires à hétérojonction le matériau à faible bande interdite formant la base du transistor et le matériau à grande bande interdite formant l'émetteur du transistor.

30 Le quatrième élément peut alors être l'indium, substitué au gallium en une fraction d'au plus 10 % environ de manière à procurer une bande interdite de 0,8 à 1 eV environ, le matériau à grande bande interdite étant GaInP avec un teneur en indium de 50 % environ de manière à procurer une discontinuité ΔE_v de 450 meV environ.

35 Le matériau formant la base du transistor présente de préférence une composition en azote qui est soit graduée, la teneur en azote étant nulle à l'interface de l'hétérojonction émetteur-base et allant croissant en allant

vers la base, soit en marches d'escalier, la teneur en azote étant nulle à l'interface émetteur-base.

La faible valeur de la discontinuité de la bande de valence ΔE_v du matériau GaInAsN par rapport à GaAs peut cependant constituer un handicap dans la réalisation de transistors TBH. La présente invention propose alors d'utiliser l'antimoine comme quatrième élément, substitué à l'arsenic en une fraction d'au plus 10 % environ, de manière à procurer une bande interdite de 0,8 à 1 eV environ.

Dans ce dernier cas, le matériau à grande bande interdite peut être GaAs, de manière à procurer une discontinuité ΔE_c de 50 meV environ et une discontinuité ΔE_v de 400 meV environ, ou bien GaInP avec une teneur en indium de 50 % environ, de manière à procurer une discontinuité ΔE_c de 100 meV environ et une discontinuité ΔE_v de 800 meV environ.

Le matériau à petite bande interdite peut être un composé quinquénaire GaInSbAsN.

◇

On va maintenant décrire un exemple de mise en œuvre de l'invention, en référence aux dessins annexés.

La figure 1 représente le schéma de bandes (de conduction et de valence) de l'hétérojonction GaAs/GaAsN.

La figure 2 représente le schéma de bandes de l'hétérojonction GaAs/GaInAsN.

La figure 3 représente le schéma de bandes de l'hétérojonction GaInP/GaAsN.

La figure 4 représente le schéma de bandes de l'hétérojonction GaInP/GaInAsN.

La figure 5 représente le schéma de bandes de l'hétérojonction GaInP/GaInAsN, dans la configuration où GaInP constitue l'émetteur d'un transistor TBH et GaInAsN en constitue la base.

La figure 6 représente la variation de la composition en azote dans la base en GaInAsN.

La figure 7 représente le schéma de bandes correspondant à l'hétérojonction décrite dans la figure 6.

La figure 8 représente la position des bandes de conduction et de valence

des composés GaAs, GaSb et InAs et des alliages ternaires GaSbAs et GaInAs.

La figure 9 représente le schéma de bandes de l'hétérojonction GaAs/GaSbAsN.

- 5 La figure 10 représente le schéma de bandes de l'hétérojonction GaInP/GaSbAsN.

◇

- 10 La figure 1 représente le schéma de bandes d'une hétérojonction GaAs/GaAsN.

- Comme l'ont montré M. Kondow et coll. (*Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 35 (1996), 1273), la réduction de la largeur de la bande interdite de GaAsN par rapport à GaAs se fait principalement par la baisse de la bande de conduction. Ce phénomène crée à l'interface de l'hétérojonction GaAs/GaAsN une forte discontinuité de la bande de conduction ΔE_c et une faible discontinuité de la bande de valence.

- Comme l'indique la figure 1, le bande de valence de GaAsN se situe en dessous de celle de GaAs. Compte tenu du fait que GaAsN en épitaxie avec GaAs est en désaccord de paramètre de maille avec ce dernier et que ce désaccord augmente avec la teneur en azote, il faut se limiter à des teneurs en azote de l'ordre de 5 % sous peine de faire apparaître des dislocations. Et en limitant à ces pourcentages d'azote dans GaAs, la largeur de la bande interdite de GaAsN sera de l'ordre d' 1 eV et par suite la discontinuité de la bande de conduction ΔE_c de l'hétérojonction GaAs/GaAsN sera au maximum de l'ordre d'une centaine de meV.

- De ce fait, l'hétérojonction GaAs/GaAsN n'est pas adaptée à la réalisation de transistors HEMT. D'autre part, la bande de valence de GaAsN se situant en dessous de celle de GaAs, l'hétérojonction GaAs/GaAsN n'est pas non plus apte à la réalisation de transistors TBH performants.

- 30 Pour réaliser un transistor HEMT performant, il faut trouver une solution pour augmenter la discontinuité ΔE_c . Cette solution, qui fait l'objet de la présente invention, consiste à utiliser l'alliage GaInAsN comme matériau à petite bande interdite. En effet, M. Kondow et coll. (référence précitée) ont montré que l'addition de l'indium à faible pourcentage dans GaAsN a pour effet de réduire la largeur de la bande interdite de GaAsN, de la

même manière que l'addition de l'indium dans GaAs fait baisser la largeur de la bande interdite de GaInAs. Et cette baisse de largeur de la bande interdite GaInAsN s'effectue au niveau de la bande de conduction plus qu'au niveau de la bande de valence.

- 5 Ceci donne pour la discontinuité ΔE_c une valeur de 500 meV environ, qui est équivalente à celle d'un HEMT pseudomorphique réalisé avec l'hétérojonction AlGaAs/GaInAs bien connue de l'homme de l'art.

- On peut augmenter encore plus la discontinuité ΔE_c si l'on utilise l'hétérojonction AlGaAs/GaInAsN, car l'hétérojonction AlGaAs/GaAs présente
10 aussi une discontinuité ΔE_c qui s'ajoute à celle de GaAs/GaInAsN. Il est connu que ce caractère de transivité de ΔE_c est vérifié sur les composés III-V, et il en résulte que l'on peut obtenir pour l'hétérojonction AlGaAs/GaInAsN des discontinuités dépassant 800 meV, valeur que l'on atteint difficilement avec les hétérojonctions sans azote. En effet, dans les hétérojonctions composées de matériaux à base d'arséniure, la plus grande
15 discontinuité ΔE_c est obtenue pour l'hétérojonction AlInAs/GaInAs où la teneur en indium est de 40 % environ. Or les composés riches en indium ont des paramètres de maille cristalline plus grands de 3 % par rapport à ceux de GaAs, et il est donc difficile de les faire croître par épitaxie sur un
20 substrat GaAs sans créer de dislocations. L'homme de l'art peut cependant limiter la propagation des dislocations dans une couche tampon, laissant ainsi des couches actives vierges de toute dislocation (voir par exemple le WO-A-99/14809 (Picogiga) ou S. Bolaert et coll. (*IEEE Electron Dev. Lett.*, 20, 123 (1999)). Ces procédés qui donnent lieu à la réalisation des HEMT métamorphiques peuvent aussi être utilisés pour épi-
25 taxier des matériaux GaInAsN à forte teneur en indium, d'environ 30 à 40 %. La discontinuité ΔE_c des hétérojonctions AlInAs/GaInAsN avec 30 à 40 % d'indium dépasse alors 1 eV.

- Une autre façon de faire, et qui fait l'objet de la présente invention, est de
30 réaliser des hétérojonctions AlGaAs/GaInAsN où la teneur en indium est choisie de telle façon que la couche épitaxiale GaInAsN soit en désaccord de maille par rapport au substrat GaAs. Le transistor HEMT utilisant une telle hétérojonction est donc un HEMT pseudomorphique donc la discontinuité ΔE_c dépasse 900 meV.

- 35 Dans ce qui a été développé ci-dessus, l'invention concerne les transis-

tors HEMT.

En ce qui concerne les transistors TBH, l'homme de l'art sait que l'hétérojonction qui constitue l'émetteur et la base du TBH doit présenter les caractéristiques suivantes :

- 5 - la bande interdite de la base doit être plus petite que celle de l'émetteur ;
- la discontinuité de la bande de valence doit être élevée ;
- la bande de valence de la base doit être située au dessus de celle de l'émetteur ;
- 10 - la discontinuité de la bande de conduction doit être faible afin de ne pas augmenter inutilement la tension d'ouverture V_{BE} du transistor.

Comme rappelé plus haut et visible sur la figure 1, l'hétérojonction GaAs/GaAsN ne satisfait pas ces conditions.

- 15 Par contre, l'hétérojonction GaInP/GaAsN y répond, à la condition d'avoir une grande discontinuité ΔE_v (fig. 3). En effet, l'hétérojonction GaInP/GaAs présente une discontinuité ΔE_v de l'ordre de 400 meV et celle de GaAs/GaAsN une discontinuité ΔE_v de -20 meV environ pour une teneur en indium de 5 %. La transitivity de la discontinuité de la bande de valence donne pour GaInP/GaAsN une discontinuité ΔE_v de 380 meV environ, ce qui est suffisant pour réaliser un TBH performant. Du côté de la bande de conduction, la discontinuité ΔE_c entre GaAs et GaAsN est de l'ordre de 50 meV et celle de GaInP et GaAs de 70 meV, ce qui donne pour l'hétérojonction GaInP/GaAsN une valeur de 120 meV, tout à fait
- 20 convenable pour réaliser un transistor TBH performant. Cependant, GaAsN à 5 % de teneur en indium présente une largeur de bande interdite proche de GaAs, soit 1,35 eV environ. Pour les applications où il faut abaisser fortement la tension d'ouverture V_{BE} , il est avantageux de réduire encore plus la largeur de la bande interdite du matériau à petite bande interdite, et le matériau GaInAsN dont on a décrit les propriétés précédemment est tout à fait indiqué.
- 30

- La figure 4 représente le schéma de bandes de l'hétérojonction GaInP/GaInAsN. La transitivity des discontinuités de bandes entre GaAs/GaInAsN et GaInP/GaAs donne pour l'hétérojonction GaInP/GaInAsN une
- 35 discontinuité ΔE_v de 450 meV environ et une discontinuité ΔE_c de

550 meV environ pour une teneur en indium et en azote de quelques pour cents chacun, afin d'avoir une largeur de bande interdite inférieure ou égale à 1 eV.

Dans cette configuration, la forte valeur de ΔE_c est, par contre, défavorable : d'une part, parce que les électrons venant de l'émetteur GaInP vers la base GaInAsN ont une énergie trop élevée et risquent d'être injectés dans la bande L du matériau où la masse effective de l'électron est grande ; d'autre part, parce qu'une grande valeur ΔE_c crée à l'interface GaInP (type n)/GaInAsN (type p) un pic d'énergie créant ainsi une barrière d'énergie que les électrons injectés de l'émetteur vers la base doivent franchir (figure 5). Une telle situation accroît la tension d'ouverture V_{BE} du transistor.

Pour réduire la discontinuité ΔE_c à l'interface de l'hétérojonction GaInP/GaInAsN, on peut réaliser une base à composition graduelle où la teneur en azote est faible, voire nulle à l'interface et augmente graduellement quand on s'éloigne de l'interface comme l'indique la figure 6.

La figure 7 représente le schéma de bandes correspondant. (on peut obtenir le même effet en utilisant une variation de composition en marches d'escalier). Dans le cas où l'on fait varier seulement la composition en azote sans changer la composition en indium, la jonction émetteur-base est une hétérojonction GaInP/GaInAs où la discontinuité de la bande de conduction ΔE_c est de 100 meV environ pour une teneur en indium de 10 %, et est tout à fait adaptée à un TBH performant. Pour une teneur en indium de 10 % la bande interdite est de 1,3 eV environ. On peut réduire encore plus la bande interdite de GaInAs en utilisant une composition en indium dépassant 25 % pour atteindre une largeur de bande interdite de 1 eV et une continuité ΔE_c de l'ordre de 200 meV. Dans ces conditions, la couche de GaInAs est fortement contrainte comme dans le cas des HEMT pseudomorphiques. L'épaisseur de la couche de GaInAs est alors de l'ordre de 10 à 12 nm.

La réduction de la discontinuité ΔE_c et l'augmentation de la discontinuité ΔE_v peuvent être avantageusement obtenues en utilisant pour la base un matériau contenant de l'antimoine, comme GaSbAs ou GaSbAsN. En effet, il est connu que le composé GaSb a sa bande de valence située juste au niveau d'énergie de celle de la bande de conduction de InAs (voir par

exemple, L. Esaki, *The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy*, Plenum Press, 1985, p.171 ou S. Sakai (précité).

En utilisant la règle simple, qui s'applique bien pour les semi-conducteurs III-V, de l'alignement de la bande de valence aux dépend de la courbure de la bande de conduction, on obtient la configuration représentée dans la figure 8.

Sur cette figure, on a représenté schématiquement la position des bandes de valence et de conduction des trois matériaux GaAs, GaSb et InAs, ainsi que celle des alliages binaires GaInAs et GaSbAs. On observe que les alliages GaSbAs ont leur bande de valence située au-dessus de celle des alliages GaInAs. Il en est de même pour leur bande de conduction. On peut déduire de la figure 8 que l'hétérojonction GaAs/GaSbAs présente une plus faible ΔE_c et une plus forte ΔE_v que l'hétérojonction GaAs/GaInAs. Il est donc plus avantageux d'utiliser l'hétérojonction GaAs/GaSbAs pour réaliser des transistors TBH.

Cependant, GaSbAs présente un écart de paramètre de maille par rapport à GaAs et l'on ne pourra donc pas avoir une teneur en indium suffisamment forte et/ou une épaisseur suffisamment forte pour réaliser une base de transistor. La substitution d'une faible concentration d'azote pour former le quaternaire GaSbAsN permet de réajuster le paramètre de maille comme dans le cas de GaInAsN et comme dans le cas de GaInAsN, une faible teneur en azote dans ce quaternaire permet de réduire en même temps la largeur de la bande interdite jusqu'à des valeurs proches de 0,8 eV, ce qui favorise la réduction de la tension V_{BE} .

Comme l'addition d'azote déplace la discontinuité ΔE_c vers les valeurs élevées, le schéma de bande de l'hétérojonction GaAs/GaSbAsN a l'allure représentée sur la figure 9. La discontinuité des bandes de cette hétérojonction n'est pas bien connue mais on peut estimer que, pour une teneur en azote de 2 à 3 % et une teneur en antimoine de 10 % environ, ΔE_c est de l'ordre de 50 meV et ΔE_v de l'ordre de 350 à 400 meV. Ces valeurs sont très comparables à celles de l'hétérojonction GaInP/GaAs, qui est connue pour être très bien adaptée à la réalisation de TBH performants.

L'association GaInP/GaSbAsN donne, par transitivité des bandes, une discontinuité ΔE_c de 100 meV et une discontinuité ΔE_v de 800 meV envi-

ron (figure 10).

- 5 Dans ce qui a été développé ci-dessus, on peut noter que l'addition d'indium dans GaAsN a pour effet de créer une forte discontinuité de la bande de conduction ΔE_c alors que l'addition de l'antimoine, une faible discontinuité ΔE_c . Et l'effet est inverse sur la discontinuité de la bande de valence ΔE_v . Il est donc possible d'ajuster les discontinuités ΔE_c et ΔE_v en utilisant les composés quinquénaires GaInSbAsN.

REVENDICATIONS

1. Un transistor à hétérojonction, comprenant des matériaux semi-conduc-
teurs III-V avec un matériau à grande bande interdite et un matériau à
5 petite bande interdite, caractérisé en ce que :
- le matériau à petite bande interdite est un composé III-V contenant
le gallium comme l'un des éléments III et à la fois l'arsenic et
l'azote comme éléments V, la teneur en azote étant inférieure à
5 % environ, et
 - 10 - le matériau à petite bande interdite comporte au moins un qua-
trième élément, III ou V,
- de manière que l'addition de ce quatrième élément permette d'ajuster la
largeur de la bande interdite, la discontinuité de la bande de conduction
 ΔE_c et la discontinuité de la bande de valence ΔE_v de l'hétérojonction.
- 15
2. Le transistor de la revendication 1, caractérisé en ce que le transistor
est un transistor à effet de champ du type HEMT.
3. Le transistor de la revendication 2, caractérisé en ce que le quatrième
20 élément est l'indium, substitué au gallium en une fraction d'au plus 10 %
environ de manière à procurer une bande interdite de 0,8 eV environ, une
discontinuité de bande de conduction de 500 meV environ et une discon-
tinuité de bande de conduction de 100 meV environ.
- 25
4. Le transistor de la revendication 2, caractérisé en ce que le matériau à
grande bande interdite est AlGaAs de fraction molaire en aluminium de
25 % environ, de manière à procurer une discontinuité ΔE_c de 800 meV
environ et une discontinuité ΔE_v de 300 meV environ.
- 30
5. Le transistor de la revendication 2, caractérisé en ce que le matériau à
grande bande interdite est GaInP de fraction molaire en indium de 50 %
environ, de manière à procurer une discontinuité ΔE_c de 500 meV environ
et une discontinuité ΔE_v de 500 meV environ.
- 35
6. Le transistor de la revendication 2, caractérisé en ce que le quatrième

élément est l'indium de fraction molaire 40 % environ, procurant ainsi un matériau à petite bande interdite en fort désaccord de maille par rapport au substrat GaAs, en ce que ce matériau à petite bande interdite est épi-taxié sur le substrat GaAs sans dislocations, et en ce que le matériau à
5 grande bande interdite est AlInAs à 40 % d'indium environ, de manière à procurer une discontinuité ΔE_c atteignant 1 eV environ.

7. Le transistor de la revendication 6, caractérisé en ce que le transistor est un transistor à effet de champ du type HEMT pseudomorphique, en ce
10 que le matériau à petite bande interdite GaInAsN possède une composition en indium et en azote telle que son paramètre de maille soit plus élevé que celui du substrat GaAs et qu'il soit dans un état de contrainte élastique, et en ce que le matériau à grande bande interdite est AlGaAs, de manière à procurer des discontinuités ΔE_c et ΔE_v de 900 meV environ.

15 8. Le transistor de la revendication 1, caractérisé en ce que le transistor est un transistor bipolaire à hétérojonction et en ce que le matériau à faible bande interdite forme la base du transistor et le matériau à grande bande interdite forme l'émetteur du transistor.

20 9. Le transistor de la revendication 8, caractérisé en ce que le quatrième élément est l'indium, substitué au gallium en une fraction d'au plus 10 % environ de manière à procurer une bande interdite de 0,8 à 1 eV environ, en ce que le matériau à grande bande interdite est GaInP avec un teneur
25 en indium de 50 % environ de manière à procurer une discontinuité ΔE_v de 450 meV environ.

10. Le transistor de la revendication 9, caractérisé en ce que le matériau formant la base du transistor présente une composition en azote graduée,
30 la teneur en azote étant nulle à l'interface de l'hétérojonction émetteur-base et allant croissant en allant vers la base.

11. Le transistor de la revendication 9, caractérisé en ce que le matériau formant la base du transistor présente une composition en azote en marches d'escalier, la teneur en azote étant nulle à l'interface émetteur-base.
35

12. Le transistor de la revendication 8, caractérisé en ce que le quatrième élément est l'antimoine, substitué à l'arsenic en une fraction d'au plus 10 % environ, de manière à procurer une bande interdite de 0,8 à 1 eV environ.

5

13. Le transistor de la revendication 12, caractérisé en ce que le matériau à grande bande interdite est GaAs, de manière à procurer une discontinuité ΔE_c de 50 meV environ et une discontinuité ΔE_v de 400 meV environ.

10

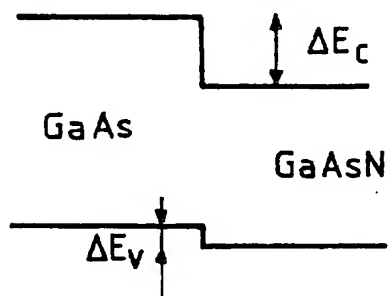
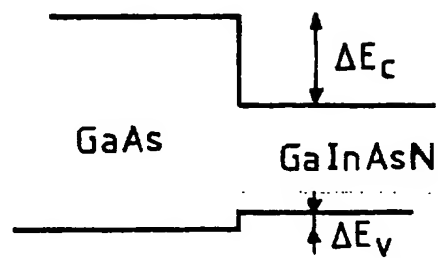
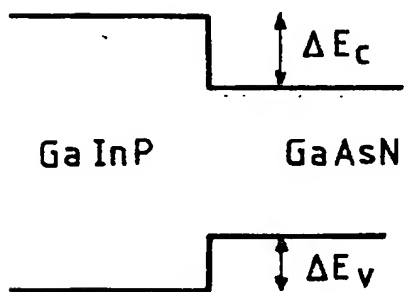
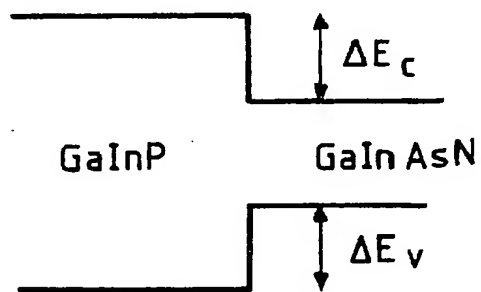
14. Le transistor de la revendication 12, caractérisé en ce que le matériau à grande bande interdite est GaInP avec une teneur en indium de 50 % environ, de manière à procurer une discontinuité ΔE_c de 100 meV environ et une discontinuité ΔE_v de 800 meV environ.

15

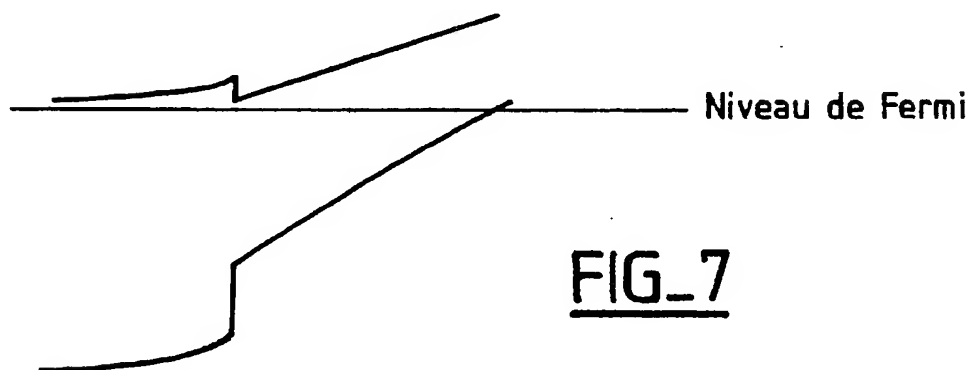
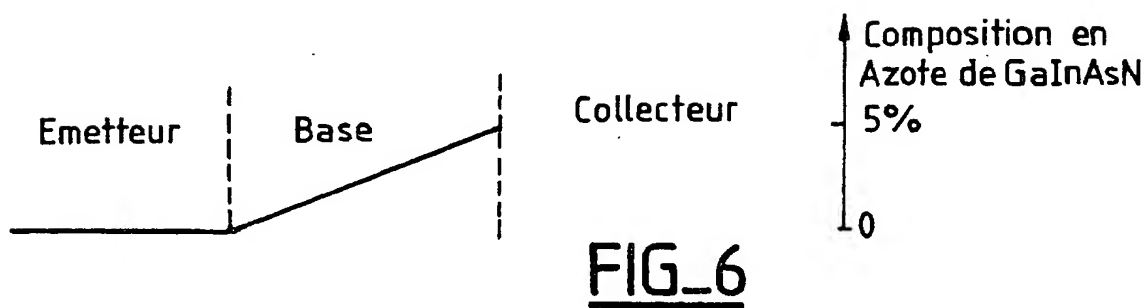
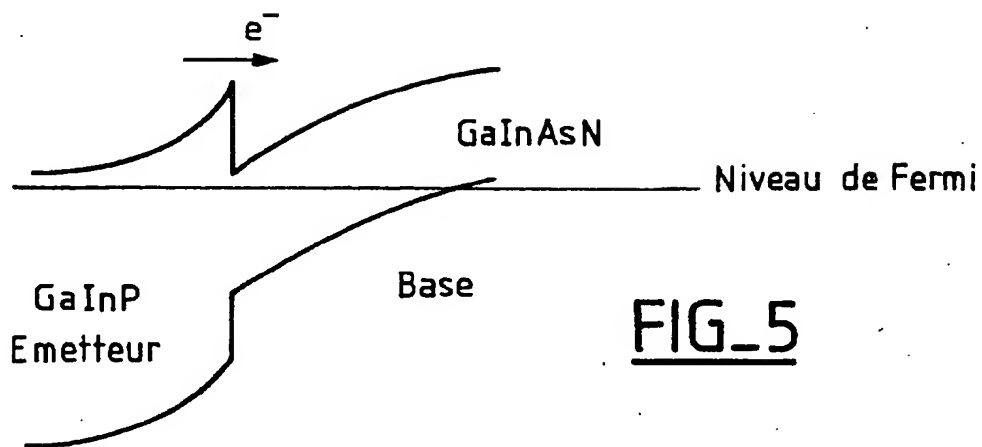
15. Le transistor de la revendication 8, caractérisé en ce que le matériau à petite bande interdite est un composé quinquénaire GaInSbAsN.

20

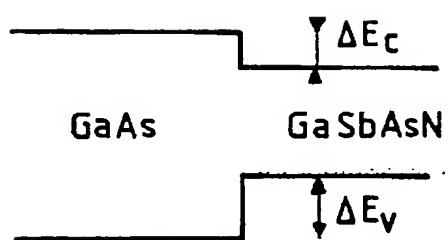
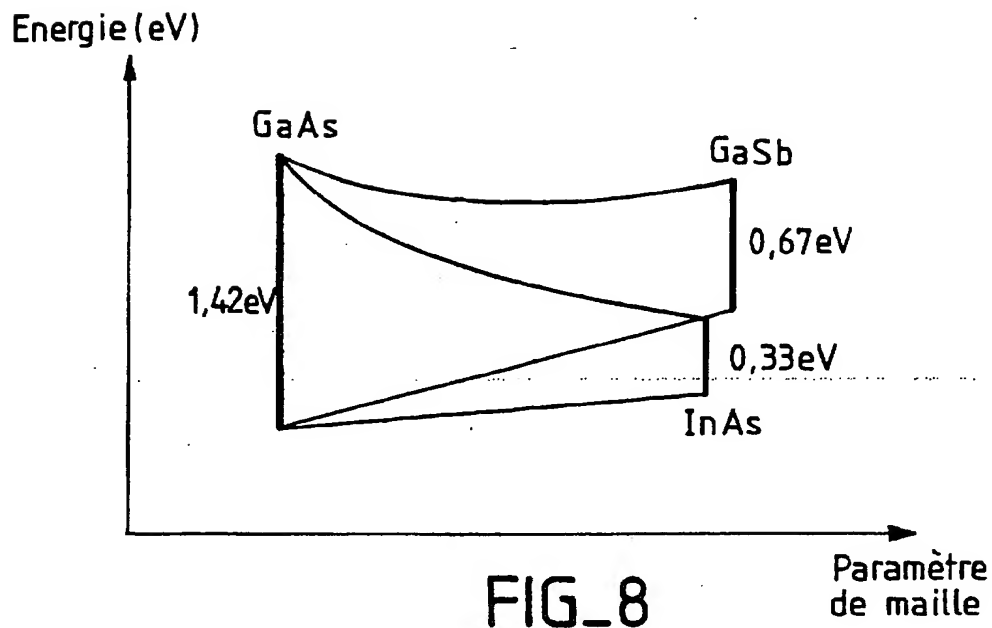
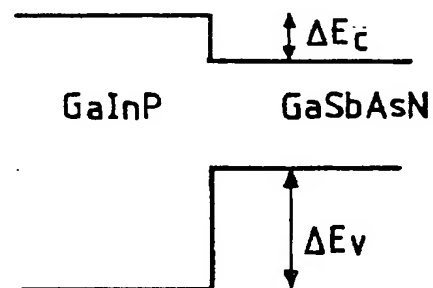
1/3

FIG_1FIG_2FIG_3FIG_4

2/3



3/3

FIG_9FIG_10



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

2795871

N° d'enregistrement
national

FA 583094
FR 9908487

| DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS | | Revendication(s) concernée(s) | Classement attribué à l'invention par l'INPI |
|--|--|---|--|
| Catégorie | Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes | | |
| A | PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 1999, no. 01, 29 janvier 1999 (1999-01-29) & JP 10 284506 A (FURUKAWA ELECTRIC CO LTD:THE), 23 octobre 1998 (1998-10-23) * le document en entier * | 1-3,6,7 | H01L29/205 H01L29/737 |
| A | EP 0 833 395 A (CANON KK) 1 avril 1998 (1998-04-01) * colonne 2, ligne 54 - colonne 3, ligne 6; revendications 1,4 * | 1-15 | |
| A | US 5 710 439 A (OHKUBO MICHIO) 20 janvier 1998 (1998-01-20) * colonne 2, ligne 33 - ligne 40 * | 2,8 | |
| A | US 5 383 211 A (BOUR DAVID P ET AL) 17 janvier 1995 (1995-01-17) * colonne 6, ligne 24 - ligne 40 * | 15 | |
| A | PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 1998, no. 14, 31 décembre 1998 (1998-12-31) & JP 10 233557 A (RICOH CO LTD), 2 septembre 1998 (1998-09-02) * le document en entier * | 5 | DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7) H01L |
| A | US 5 903 586 A (RAMDANI JAMAL ET AL) 11 mai 1999 (1999-05-11) * revendications 1-15 * | 1-15 | |
| D,A | WO 99 14809 A (PICO GIGA SA ; NUYEN LINH T (FR); ZERGUINE DJAMAL (FR)) 25 mars 1999 (1999-03-25) * page 1, ligne 20 - ligne 29 * | 2 | |
| -/-- | | | |
| Date d'achèvement de la recherche | | Examineur | |
| 28 juillet 2000 | | Juhl, A | |
| CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS | | | |
| X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire | | T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant | |



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

2795871

N° d'enregistrement
national

FA 583094
FR 9908487

| DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS | | Revendication(s) concernée(s) | Classement attribué à l'invention par l'INPI |
|--|--|--|--|
| Catégorie | Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes | | |
| E | <p>DATABASE WPI Derwent Publications Ltd., London, GB; AN 2000-309926 XP002143756 & JP 2000 091559 A (FUJITSU), 31 mars 2000 (2000-03-31) * le document en entier *</p> <p>-----</p> | 1-3 | <p>DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7)</p> |
| Date d'achèvement de la recherche | | Examineur | |
| 28 juillet 2000 | | Juhl, A | |
| CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS | | | |
| <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p> | | <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant</p> | |

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.